

研究・調査

衝突針路を使ったOZT算出方法

今 津 隼 馬

Computation of OZT by using Collision Course

Hayama IMAZU

キーワード: 避航、OZT、衝突針路、衝突危険、LOPC

1. はじめに

相手船による妨害ゾーン (OZT) は、2002 年に発表しました⁽¹⁾が、この時の OZT 算出方法は、相手船経路上を細かく分けて計算する方法であり、算出に時間がかかりました。そこで、この OZT 算出方法を、衝突針路を使って簡単にする方法を考案しました。また、本手法を使って、相手船の針路、速力により OZT がどのように変わるかを衝突予測線 (LOPC)⁽²⁾との関係を中心に調べてみました。その結果、本手法を使えば OZT 算出時間が前回に比べ 1/6 程度に短縮すること、また、OZT が LOPC 上かその近傍に現れることが判りました。

2. 衝突針路範囲と OZT

相手船と衝突しないためには、相手船の最接近距離を安全に航過できる最小距離 (最小安全航過距離) 以上確保する必要があります。一般には相手船の最接近距離が 0 になる場合の自船針路を衝突針路としますが、ここでは最接近距離が最小安全航過距離となる自船針路を衝突針路とします。以下、衝突針路の算出と、これを基にした OZT の算出方法についてまとめました。

2.1 衝突針路算出

相手船と衝突しないためには、相手船との距離を最小安全航過距離 r 以上確保する必要があります。即ち相手船の予想される最接近距離が次の条件を満たすことが必要になります。

$$DCPA \leq r \quad (1)$$

図 1 は自船 O と相手船 T との間で $DCPA=r$ となる針路を求める図です。

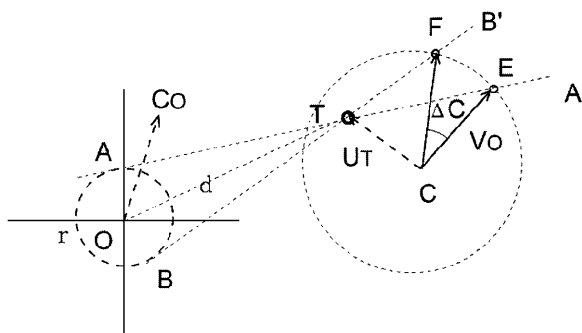


図 1 相手船の $DCPA=r$ とする自船針路

ここで自船針路を求める手順は、次の通りです。

- ① 自船 O を中心に半径 r の円を描きます
- ② 相手船の位置 T からこの円に接線、AA' と BB' を描きます
- ③ T から相手船の運動ベクトル UT を図のように描き、その端点を C とします
- ④ C を中心として半径が自船速力 Vo の円を描きます
- ⑤ この円と、さきほどの接線との交点を E、F とします
- ⑥ C と交点 E、F を結ぶ線分、CE、CF が $DCPA=r$ となる自船針路となります。また、この二つの針路に挟まれた ΔC が衝突針路範囲となります。

次にこの衝突針路を計算で求めてみます。先ず T

から引いた接線の角度 α は、相手船の距離を d とすると、

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{r}{d} \quad (2)$$

となります。この接線と自船速力円（ C を中心として半径が V_o の円）の交点 E 、 F とし、 CE 、 CF の向きを衝突針路 Co 、相手船の方位を Az 、針路を CT 、速力を VT とすると、速力三角形における正弦法則から、次の関係が成立します。

$$\begin{aligned} \frac{\sin(Az \pm \alpha - Co)}{V_T} &= \frac{\sin\{C_T - (Az \pm \alpha) - 180\}}{V_o} \\ &= \frac{\sin(Az \pm \alpha - C_T)}{V_o} \end{aligned} \quad (3)$$

これから

$$Co = Az \pm \alpha - \sin^{-1} \left\{ \frac{V_T}{V_o} \sin(Az \pm \alpha - C_T) \right\} \quad (4)$$

として $DCPA=r$ となる針路 Co を求めることができます。この式から Co としては、一本の接線に対して2つ、合計で最大4つの解が存在することになります。ただし、式(4)の右辺の $\{\}$ の中の値が次の条件を満足する場合にのみ Co が存在します。

$$\left| \frac{V_T}{V_o} \sin(Az \pm \alpha - C_T) \right| \leq 1 \quad (5)$$

また求められた Co でも、これによる $TCPA < 0$ であれば解から除きます。なお、 $TCPA$ の算出は次の様に行います。

まず、それぞれの船による X 軸 Y 軸成分、 ΔX と ΔY を求め、これから相対運動を算出します。

$$\begin{aligned} \Delta X &= V_T \sin C_T - V_o \sin Co \\ \Delta Y &= V_T \cos C_T - V_o \cos Co \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_R &= \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \\ C_R &= \tan^{-1} \frac{\Delta X}{\Delta Y} \end{aligned} \quad (7)$$

距離が d である相手船は、この相対運動で自船に接近しますので、

$$\begin{aligned} DCPA &= d |\sin(C_R - Az + 180)| \\ TCPA &= \frac{d \cos(C_R - Az + 180)}{V_R} \end{aligned} \quad (8)$$

となります。こうして Co の解について調べた結果、 $N=VT/V_o < 1$ の場合、即ち自船速力の方が目標速力よりも速い場合の Co の解は2つ、 $N=1$ の場合は0か2つ、 $N > 1$ の場合は、0、2、4の3組の解のあることが判りました。

2.2 OZT の算出

図2は、衝突針路とOZTの関係を示す図です。

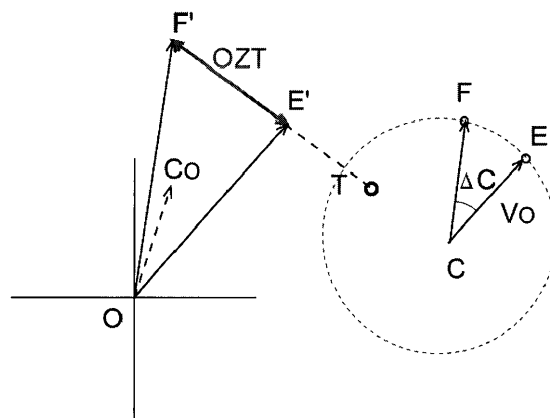


図2 衝突針路とOZT

図1で求められた衝突針路 Co を使い、自船の位置 O から CE 及び CF に平行な線を引き、これと相手船の経路を延長した線 TF' との交点を求め、これを E' 、 F' とすれば、この $E'F'$ が OZT に相当します。以前提案しました OZT は、これに到達時間誤差分を含めたゾーンです。時間誤差の取り扱いについては後述します。誤差を含まない OZT は、衝突針路を相手船の経路上に転記したものとみることができます。また、 OZT の計算は、次のように行います。

- ①衝突針路の解として採用した Co を使い、 $TCPA$ を求めます。 $TCPA$ としては2つか4つになりますので、これを時間順に並べます。

$$TCPA_1 \leq TCPA_2 < TCPA_3 < TCPA_4 \quad (9)$$

- ②それぞれの $TCPA$ までの間に相手船は航行しますので、その航走距離を求めます。そしてこの距離に応じて相手船の経路を延長します。

$$\begin{aligned} f &= V_T \times TCPA \\ f_1 &\leq f_2 < f_3 < f_4 \end{aligned} \quad (10)$$

- ③延長した相手船の経路上で、(10)で求めた点

を図3に示すように取ります。この時の $f_1 \sim f_2$ 及び $f_3 \sim f_4$ の部分が OZT になります

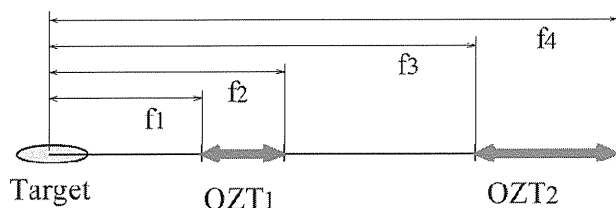


図3 相手船の経路上における OZT

図3は $N > 1$ の時に、Co の解が4つあるケースです。このように、衝突針路範囲に相当する情報を、自船の行動を妨害するゾーン OZT として、相手船の経路上に表示することにより、次のような利点が生れます。

- ①交通が輻輳した海域でも、どの相手船がどこにどの程度の妨害ゾーンを創出しているのか相手船毎に判ります
- ②避航経路として近傍の OZT を外すような、折れ線による経路を計画することが可能になります。それに比べ、TCPA や DCPA 等の相対運動に基づいた避航計画では、直線を当てはめるため、船の数が増えると、避航経路選択のためシミュレーションが必要になります。
- ③真運動に基づいて避航経路の計画ができますので、可航水域等の他の障害物情報も同じ座標で扱えます。このため、電子海図上で避航計画を立てることが可能になります。

2.3 使用情報誤差を考慮した OZT

避航では相手船の今後の運動を予測する必要があります。この予測で難しい事としては、相手船の行動変化と外力等による運動変化があります。このうち行動変化についての対応は、もし予測が外れてもそれに対応できるだけの十分な時間的・距離的余裕を持って行動すること、また、外力影響については衝突に至るまでの時間（ここでは TCPA）に幅を持たせる方法があります。

前回提案しました OZT では、相手船が到達する時間に誤差が含まれるものとして取り扱いましたので、今回も同様に時間に誤差があるとして、次のように扱うことにしました。

- ①現実の TCPA は気象・海象や船の性能により変動します。ここではこうした TCPA の変動誤差幅を単純に、TCPA に比例するとします。例えば TCPA に対して TCPA の $\eta\%$ の範囲で変動誤

差 ε があるとします。

$$\varepsilon = TCPA \times \frac{\eta}{100} \quad (11)$$

- ②この誤差の分 OZT を拡大します。ここでは、 f_1 と f_3 はその分、相手船からの距離を短く、 f_2 と f_4 はその分、距離を長くします

$$\begin{aligned} f_{1,3} &= (TCPA - \varepsilon) \times V_T \\ f_{2,4} &= (TCPA + \varepsilon) \times V_T \end{aligned} \quad (12)$$

とします。もしこの結果 f_2 と f_3 の順序が逆転する場合は、二つの OZT を一つの OZT に統合します。

3. 相手船による OZT の特徴

ここでは、遭遇した相手船の状況により OZT はどう変わるか調べてみました。

3.1 相手船針路と OZT

OZT は、相手船の針路上に、自船と衝突する可能性のある場所を示すものです。また、自船と相手船の速力比による LOPC を知れば、相手船の針路あるいは変針により、OZT の場所がどこにあり、変針によりその場所がどう変わるかを知ることができます。図4の左図(a)は、O 船（12 ノット）から3海里離れたところに O 船より少し遅い T 船（10 ノット）があり、その T 船の針路を 2° 間隔で変化させたときの OZT（O 船側に表示する）を示しています。また右図(b)は同じ遭遇で今度は O 船が針路を 2° 間隔で変化させたときの、O 船による OZT（T 船側に表示する）を示しています。

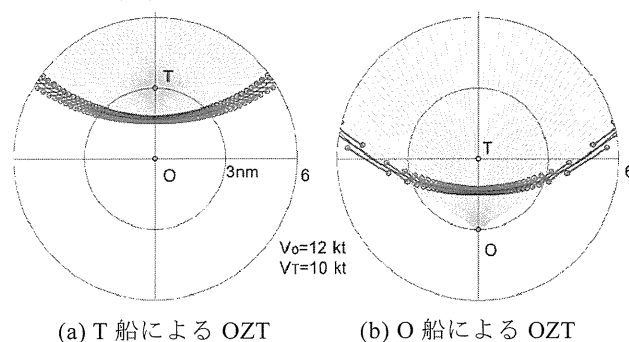


図4 T 船 O 船による針路 2° 毎の OZT

この図から明らかなように、O 船と T 船の間に描かれる LOPC は、同じです。しかし、OZT の幅と表れ方には違いがあります。左図のように速力の遅い船による OZT では、あらゆる針路に対して一つの OZT があります。このことは、速力の遅い船では衝突の可能性が常にあること、衝突回避には、速力の速い船の協力が不可欠であることを意味し

ています。

一方、右図のように速力の速い船（O 船）による OZT は、LOPC 上かその近傍に OZT がありますが、OZT が存在しない針路があります。このことは、速力の速い船は速力の遅い船の行動に依存せずに衝突回避できる針路があることを示しています。また、左図と右図の OZT の長さを比べると、速力の遅い船による OZT の長さは短く、速力の速い船による OZT では長さが長くなっています。このことから、速力の遅い船にとっては、速力の速い船による長い OZT を避ける必要があり、このため遅い船による避航では、速力の速い船の避航に比べて大きく変針する必要があると判ります。

3.2 相手船距離と OZT

図 5 は同速船の場合の OZT です。LOPC は O 船と T 船を結ぶ OT 線の二等分線になります。T 船の針路に応じて OZT の場所が変わる様子が見えます。これから、T 船が変針した場合の OZT の場所を予想することができます。

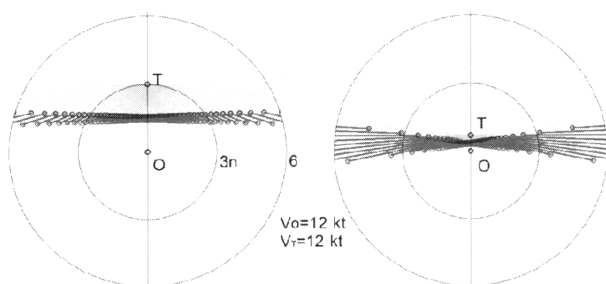


図 5 同速の場合の T 船針路による OZT

ここで、左図は目標までの距離が 3 海里の場合です。また、右図は目標までの距離が 0.7 海里の場合です。これから、相手船までの距離が 3 海里ですと OZT が存在しない O 船の針路は、相手を正横から後に見る針路になります。しかし、相手の距離が近いと、右図からも判るように、OZT の存在する範囲が広がるため、OZT の存在しない針路は、左図の場合より狭くなり、さらに相手を後に見る針路にする必要があることが判ります。また、相手が近くなると OZT の長さも長くなります。

3.3 OZT の時間変化

図 6 は $N=1.5$ の遭遇で、O 船と T 船が衝突するように接近しているときの OZT です。このケースでは、速力の速い T 船の針路線 CT が LOPC と 2 箇所で交わりますので、そこに OZT₁ と OZT₂ ができ、これが O 船側に表示されます。一方、O 船の針路線 CO が LOPC と交わるのは 1 箇所で、そこに OZT ができて T 船側に表示されます。

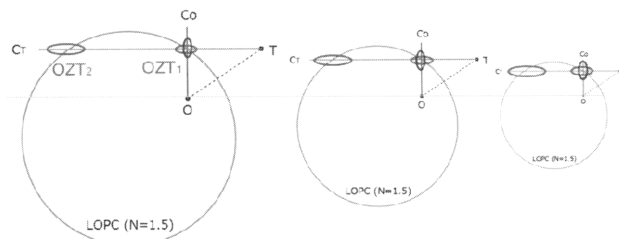


図 6 時間経過と OZT 変化

両船がこのまま進むと、両船の距離は短くなり、それに応じて、右側の図のように LOPC も小さくなり、それぞれの船首方向にある OZT は、真っ直ぐに近づいてきます。このように、衝突する関係にある場合は、両船の船首方向に OZT が表示されます。変針した場合は、OZT は LOPC 上を変針した方向に移動します。

4. まとめ

以上、OZT の計算手法を改善し、各遭遇における OZT の特徴についてまとめてみました。計算が速くなったことから、実際の船舶交通観測においても実時間で活用できるのではないかと期待しています。

参考文献

- (1) 今津隼馬、福戸淳司、沼野正義：相手船による妨害ゾーンとその表示について、日本航海学会論文集、No107、pp191-197、2002
- (2) 今津隼馬：衝突予測線と衝突危険、NAVIGATION、No186、pp41-44、2013.10



今津隼馬

正会員 東京海洋大学名誉教授
himazu@aol.com

平成 26 年 3 月 12 日投稿